

人—ロボット共存環境において人とスムーズにすれ違う移動ロボットの開発

東京大学 ○福澤 知浩, 田村 雄介, 浅間 一

Development of Mobile Robot Passing People Smoothly in Human-Robot Coexisting Environment

The University of Tokyo, Tomohiro Fukuzawa, Yusuke Tamura, Hajime Asama

Recently, as more robots work in the same space as men, they are desired not to make humans stressful. The purpose of this study is to develop a mobile robot passing people smoothly. As humans move according to their intentions, we estimated them. Concretely, we estimated whether they are trying to avoid a robot through the trajectory of them. Then, we implemented an algorithm of estimating humans' intention by tracking their legs. Based on the estimation and the social force model, the robot makes a path plan.

1. 序論

近い将来, サービスロボットが市場に出回ることが予想されている. このようなロボットは, 人と同空間で移動することが求められているため人との衝突を回避する機能が必要である. これまでに, 人を移動する障害物と捉え, その移動障害物を回避するロボットに関する研究は数多く行われてきた¹⁾.

しかしながら, このような研究においては, ロボットが移動することによって, 人の行動が変化する可能性があることが考慮されていない. 人は, 単純な移動障害物とは異なり, 周囲の環境の変化に合わせて自身の行動も変化させるため, 移動ロボットを回避するために自らの動きを変化させることもあり得るのである.

伊藤らは, 人の進路変更の際の, 脚の形状や顔の向きの変化を見て, 人の進行方向を予測し, それとは逆に避ける移動ロボットを実現している²⁾. しかし, この研究では人がロボットに気づいていることが前提となっており, 人が気づいていないときに危険な事態に陥ることも考えられる.

村上らは, 人の顔の向きを見ることによって, 人がロボットに気づいているかどうかを判断し, 人を回避する電動車いすを実現している²⁾. しかし, 人の顔の向きを見るだけではロボットに気付いているかどうかは分からず, また, たとえ気付いているかどうか分かっていても実際に避けるかは分からないという問題点がある.

そこで, 本研究では, 人がロボットを避けようとしているかどうかを考慮することで人とスムーズにすれ違う移動ロボットを提案する.

2. 人のトラッキング

2.1. 人の検出

本研究では, 地面から 50cm の高さにおいて LRF(Laser Range Finder)を用いて人の両脚を計測することによって, 人の検出を行う.

まず, ある特定の瞬間に LRF から角度 i と, それに対応する距離データ d_i を得る. (図1)

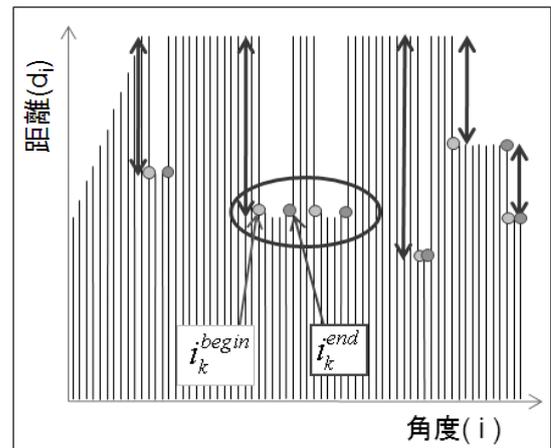


図1. LRF 取得データの角度と距離の関係

空間内で LRF が検出した障害物の端に対応するデータと, それに隣接した取得データの大きさの差, つまり d_{i-1} と d_i の差が大きくなる. 脚と背後の障害物にはある程度の距離があることから,

$$d_i - d_{i-1} > \varepsilon_1 \text{ の時 } i_k^{\text{begin}} = i \quad (1)$$

$$d_{i-1} - d_i > \varepsilon_1 \text{ の時 } i_k^{\text{end}} = i \quad (2)$$

$$(k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

のように i_k^{begin} と i_k^{end} を定義する. k は i が小さい順に $k=0, 1, 2, \dots$ とする. i_k^{begin} と i_k^{end} の間が脚候補の障害物となっている.

次に, 人の脚の太さはある範囲内に限定されることを用いる. 脚が LRF から離れている程, 脚が検出される角度が少なくなることを考慮し,

$$\varepsilon_2 / d_{i_k^{\text{end}}} < i_k^{\text{end}} - i_k^{\text{begin}} \quad (3)$$

$$i_k^{\text{end}} - i_k^{\text{begin}} < \varepsilon_3 / d_{i_k^{\text{end}}} \quad (4)$$

に当てはまるもののみを脚の候補として残す.

さらに, 人の右脚と左脚の間隔は, 通常, ある一定の範囲内に収まる. これを基に, 以下の式に当てはまるものを脚候補として残す.

$$i_{k+1}^{\text{begin}} - i_k^{\text{end}} < \varepsilon_4 / d_{i_k^{\text{end}}} \quad (5)$$

また, この式には k が小さい値のものから当てはめ, 脚の

ペアを見つけると、それを人として括り、次に上記の式が当てはまるペアを探すという繰り返しをすることで人を検出する。

2.2. 人のトラッキング

上記における i_{k+1}^{begin} , i_k^{end} の中点を人の重心とし、カルマンフィルタを用いて、人の重心位置のトラッキングを行った。

カルマンフィルタは、観測値 y_t 、一時点前の推測値 θ_{t-1} から現在の推測値 θ_t を推定するもので、用いる式は以下のとおりである。 (δ_t^2) は分散

$$\theta_t = G_t \theta_{t-1} + \frac{F_t \rho_t^2}{F_t \rho_t^2 + \sigma_t^2} \mathbf{e}_t \quad (6)$$

$$\delta_t^2 = \frac{\rho_t^2 \sigma_t^2}{F_t \rho_t^2 + \sigma_t^2} \quad (7)$$

3. すれ違いアルゴリズム

本研究では、人がロボットを避けようとしている場合には、ロボットは人を避けることなく目的地へ直進し、人がロボットを避けようとしていない場合には、ロボットは人を回避するとする。人がロボットを避けようとしているか否かは、LRFによって得られる人の重心の軌跡を解析することで判断する。

本研究では、歩行者のモデルとして Helbing らによる Social force model を導入する⁴⁾。Social force model は、人は目的地や周囲の環境にある障害物から力を受けて動くとしたモデルであり、人の歩行モデルの研究で数多く用いられている⁵⁾。本研究では、このモデルで用いられる力のうち、目的地からの引力 $\mathbf{F}_1(t)$ と障害物からの斥力 $\mathbf{F}_2(t)$ を用いる。 $\mathbf{F}_1(t)$ 、 $\mathbf{F}_2(t)$ は以下の通りである。

$$\mathbf{F}_1(t) = (\mathbf{V}e(t) - \mathbf{v}(t)) / \tau \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{p}(t) - \mathbf{r}_i(t)}{|\mathbf{p}(t) - \mathbf{r}_i(t)|} U_i e^{-|r_i(t) - \mathbf{p}(t)|/R_i} \quad (9)$$

$\mathbf{p}(t)$: 歩行者の位置, $\mathbf{v}(t)$: 歩行者の速度, \mathbf{r}_i : 障害物 i の位置
 $\mathbf{V}e(t)$: 歩行者にとって望ましい速度
 τ : 緩衝時間定数, U_i , R_i : 障害物 i に関する緩衝定数

人はロボットを回避するときに、Social force model で生成される軌跡をとるとし、この軌跡を以下では『回避軌跡』と呼ぶ。一方、ロボットがないとき、人は目的地に向かってまっすぐ歩く。この軌跡を以下では『直進軌跡』と呼ぶ。

ロボットに搭載された LRF が人を検知すると、ロボットは想定される回避軌跡と直進軌跡を生成する。この軌跡は、ロボットが目標に向かって直進すると仮定した時のものである。ある時刻 t にロボットがいる位置を O とし、ロボットの初速度方向に x 軸、 x 軸と垂直方向に y 軸をとった相対座標系を考える。想定される直進軌跡、

回避軌跡をそれぞれ $y=f_1(x)$, $y=f_2(x)$ とおく。ただし、人の目的地の方向は知ることができないため、時間 T の間に歩行者が進んだ方向を目的地の方向と仮定する。

そして、人の実際の軌跡(時刻 t における位置 $P(x_t, y_t)$ の集合)を見て、人が直進軌跡を進んでいるか回避軌跡を進んでいるかの尤度を求める。これは P が 2 つの軌跡モデルのどちらとより近接した部分を進んでいるかによって決まる。直進、回避の尤度はそれぞれ Pr_1, Pr_2 とおき、

$$Pr_1 = \left| \frac{f_2(x_t) - y_t}{f_1(x_t) - f_2(x_t)} \right| \quad (10)$$

$$Pr_2 = \left| \frac{f_1(x_t) - y_t}{f_1(x_t) - f_2(x_t)} \right| \quad (11)$$

とする。

$Pr_1 > Pr_2$ の場合は、人はロボットを避けようとしていないと判断し、ロボットは人を回避する。一方、 $Pr_1 \leq Pr_2$ の場合は、人はロボットを避けようとしていると判断し、ロボットは人を回避することなく、目的地へ直進するとする。

4. 結論・展望

本研究では、人がロボットを避けようとしているかどうかを考慮することで、人とスムーズにすれ違う移動ロボットのモデルを提案した。

今後の課題としては、本研究で提案したモデルを実際にロボットに実装し、モデルの妥当性を検証する必要がある。評価方法としては、当モデルと既存のモデルでの、すれ違いにおける人の歩行軌跡や人の心理変化の比較などがあるだろう。これにより、人とスムーズにすれ違うロボットを実現したい。

参考文献

- 1) D Fox, W Burgard, S Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, March, pp.23-33(1997)
- 2) 伊藤明久, 今井順一, 金子正秀, "対向者の歩行動作の観測と予測に基づくロボットの自律的すれ違い," FIT2008(第7回情報科学技術フォーラム), p.511-512(2008)
- 3) 村上佳史, 久野義徳, 島田伸敬, 白井良明, "知的車椅子のための歩行者の顔の観察に基づく衝突回避," 日本ロボット学会誌, Vol. 20 No. 2, pp.206-213 (2002)
- 4) Dirk Helbing, Péter Molnár, "Social force model for pedestrian dynamics," *Physical review E*, vol.51, no.5, pp.4282-4286 (1995)
- 5) 柳沢豊, 山田辰美, 平田圭二, 佐藤哲司, "視線に基づくサブゴール決定過程を取り入れた歩行者モデル," 情報処理学会論文誌, Vol.47 No.7, pp.2160-2167 (2006)